

文章编号 1004-924X(2013)12-3118-08

## 硅微机械陀螺仪测控电路的温度补偿

曹慧亮,李宏生\*,王寿荣,杨波,黄丽斌

(东南大学 仪器科学与工程学院 微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室,江苏 南京 210096)

**摘要:**提出了一种基于微机械陀螺仪测控电路进行温度补偿的方法。介绍了本课题组自主研发的 SHH17# 陀螺结构,分析了温度变化对陀螺的影响,并对驱动和检测模式的谐振频率,品质因数以及标度因数和零偏进行了测试。分析了陀螺结构的动力学方程以及测控电路,指出了标度因数与驱动幅度和检测回路增益成正比,与两模式频差成反比。以热敏电阻为补偿元件在检测次级放大器中补偿标度因数,然后以直流叠加的方法在低通滤波器模块对零偏的温度系数和输出值进行了补偿,并介绍了补偿参数的配置方法。实验显示,经过温度补偿,标度因数和零偏的温度系数分别由  $393 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  和  $75(^{\circ}) \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  减小到了  $73 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  和  $20(^{\circ}) \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , 补偿后  $0^\circ\text{C}$  零偏值由 89.59 mV 减小到 7.33 mV,标度因数和零偏的温度系数分别减小了 80% 和 73%。得到的结果证明了补偿方法的正确性和可行性。

**关键词:**硅微机械陀螺仪;测温电路;温度补偿;标度因数;零偏;热敏电阻

**中图分类号:**U666 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132112.3118

## Temperature compensation of monitoring circuit for silicon MEMS gyroscope

CAO Hui-liang, LI Hong-sheng\*, WANG Shou-rong, YANG Bo, HUANG Li-bin

(Key Laboratory of Micro Inertial Instrument and Advanced Navigation Technology of the  
Ministry of Education, School of Instrument Science and Engineering,  
Southeast University, Nanjing 210096, China)

\* Corresponding author, E-mail: hsl@seu.edu.cn

**Abstract:** A temperature compensation method was proposed based on the periphery circuit of a Micro-electronic-mechanical System (MEMS) gyroscope. The structure of SHH17# MEMS gyroscope developed by ourselves was introduced, the effect of temperature changes on the gyroscope was analyzed, and the resonant frequency, quality factor, scale factor and the null bias of driving and sensing modes were tested. The dynamic equation and test circuits of the gyroscope were analyzed, then it points out that the scale factor is in direct proportion to driving amplitude and the gain of sense loop, and is in indirect proportion to the frequency gap between two modes. A thermal resistant was taken as the compensation element to compensate the scale factor in a secondary amplifier, then the temperature coefficients and output values of the null bias were compensated by superposing a reference voltage within the low pass filter in an output module. Furthermore, the circuits of the two compensation

收稿日期:2013-06-05;修订日期:2013-07-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60974116, No. 61101021, No. 61104217);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2010401)

points were expanded and the parameter's configuration details were introduced. Experiments indicate that the temperature coefficients of scale factor and null bias have reduced from  $393 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-6}$  and  $75 (^\circ) \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  to  $73 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  and  $20 (^\circ) \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  respectively (reduce by 80% and 73%) and the null bias values have decreased from 89.95 mV to 7.33 mV. These results demonstrate that the proposed method is feasibility and correction.

**Key words:** Silicon Micro-electronic-mechanical System (MEMS) gyroscope; monitoring temperature circuit; temperature compensation; scale factor; bias; thermal resistant

## 1 引言

微机械陀螺仪是 MEMS 技术在惯性领域的重要应用,主要包括陀螺结构和测控电路两部分。陀螺结构利用振动的质量块在旋转时产生的哥氏加速度来检测输入角速度信号,由硅材料加工而成。测控电路为结构提供稳定的驱动信号并检测敏感结构的位移信号<sup>[1-2]</sup>。相比其他陀螺仪,微机械陀螺仪具有成本低、体积小、功耗低、可批量生产等优点,但其精度较低,无法满足高精度场合的需求<sup>[3-4]</sup>。影响硅微机械陀螺仪精度的因素很多,温度是其中的一个重要因素<sup>[5]</sup>,主要体现在谐振频率、品质因数、标度因数和零位输出(零偏)。由于硅微陀螺仪结构微小和一次加工成型等特殊性质,使得绝大多数传统惯性器件的温度补偿技术很难适用<sup>[6]</sup>。近些年国内外一些文献相继介绍了改善硅微陀螺温度性能的方法,主要包括了以下几种:

一是针对微结构:采用结构的对称设计和新工艺以减小温度影响<sup>[7-8]</sup>。该方法虽然可以消除部分的温度影响但容易被加工过程的不确定因素干扰。

二是针对陀螺仪的工作环境温度:一些文章选择在陀螺结构芯片内部<sup>[9-10]</sup>进行温度控制,使其工作环境恒温。此方法不仅会增加加工难度,同时加热不均也会导致结构的非理想形变,影响测量精度。另外一些文献则在陀螺仪外壳内进行温度控制<sup>[11-12]</sup>,该方法的问题是温度检测点和加热点的选取,此外还会增加系统的功耗。

三是针对测得输出值的后续处理:用不同的算法进行后期的温度补偿<sup>[13-15]</sup>。这种方法需要对采集的输出值进一步处理,不但会占用系统资源而且也无法很好地保证其实时性。

四是针对于测控电路:建立动态温度特性模型,以测控电路为基础实施温度补偿算法继而补偿温度漂移<sup>[16-17]</sup>,该方法能简单、有效的改善温度特性而不引入其他不利因素。

上述文献绝大多数都是针对零位输出(零偏)补偿的,而对于标度因数温度补偿方法却介绍得很少。本文以自主研发的 SHH17 # 硅微机械陀螺仪为研究对象,基于模拟电路对标度因数和零偏的温度补偿技术进行了深入研究,并以大量的实验数据证明了提出的方法可以在很大程度上提高样机的温度特性。

## 2 温度对微机械陀螺仪的影响

### 2.1 硅微敏感结构介绍

SHH17 # 陀螺仪的硅微结构<sup>[18]</sup>如图 1 所示,驱动模态沿 X 方向运动,由敏感质量块、驱动梁、驱动框架和驱动梳齿组成;检测模态包括敏感质量块、检测梁、检测框架和检测梳齿,沿 Y 方向运动。该结构有以下特点:(1)采用双质量对称结构,有利于减小温度对结构影响产生的不对称形变;(2)采用了大的敏感质量块,增大了哥氏力,使

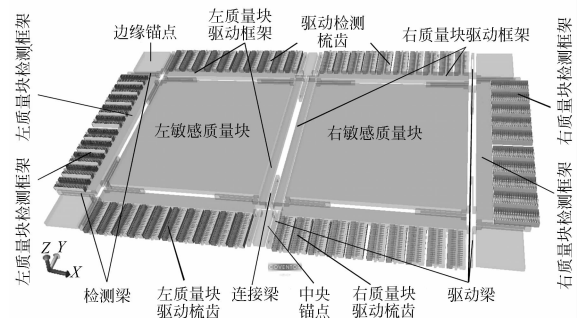


图 1 硅微机械陀螺仪结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MEMS gyroscope structure

其更易于被检测;(3)质量块和梳齿框架之间由 U 型梁连接可以释放更多的残余应力<sup>[19]</sup>; (4)采用反相滑膜驱动和差动滑膜检测,有效地消除了两质量块敏感方向共模扰动位移的影响,并可提高信号的信噪比;(5)结构中的梳齿电容均采用滑膜工作方式,具有更好的线性度。

陀螺结构在工作状态下,左右驱动模式以其固有谐振频率沿 X 轴反方向振动,当有角速度绕 Z 轴输入时,2 个敏感质量块受哥氏效应的影响在 Y 方向上产生反向的位移,通过检测梁带动检

测梳齿框架移动,改变检测电容信号。理想状态下其驱动和检测模式的运动方程为<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} m_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = F_d = A_F \sin(\omega_d t) \\ m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = -2m_y \Omega_z \dot{x} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $m_x$  和  $m_y$  分别为驱动和检测模式的等效质量;  $c_x$ 、 $k_x$  和  $c_y$ 、 $k_y$  分别为驱动和检测模式的有效阻尼和刚度;  $F_d$  为驱动力,  $A_F$  为其幅度,  $\omega_d$  为其角频率;  $t$  为时间;  $\Omega_z$  为绕 Z 轴输入的角速度; 令驱动频率等于驱动模式谐振频率则驱动和检测位移  $x$  和  $y$  可分别表示为:

$$\begin{cases} x = \frac{A_F Q_x}{m_x \omega_d^2} \sin\left(\omega_d t - \frac{\pi}{2}\right) \\ y = \frac{2X_A \Omega_z \omega_d}{\omega_{ny}^2} \frac{1}{1 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_{ny}^2}\right)^2 + \frac{1}{Q_y^2} \left(\frac{\omega_d}{\omega_{ny}}\right)^2}} \sin(\omega_d t - \varphi_y), \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $X_A$  为驱动位移幅度;  $\omega_{nx} = \omega_d = \sqrt{\frac{k_x}{m_x}}$ ,  $\omega_{ny} = \sqrt{\frac{k_y}{m_y}}$ ,  $Q_x = \frac{m_x \omega_{nr}}{c_x}$ ,  $Q_y = \frac{m_y \omega_{ny}}{c_y}$  分别为驱动和检测模式的谐振角频率和品质因数; 相位  $\varphi_y = \arctan \frac{\omega_{ny} \omega_d}{(\omega_{ny}^2 - \omega_d^2) Q_y}$ 。可得陀螺结构的机械灵敏度  $S_y$  为:

$$S_y = \frac{Y_A}{\Omega_z} = \frac{2X_A \omega_d}{\omega_{ny}^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_{ny}^2}\right)^2 + \frac{1}{Q_y^2} \left(\frac{\omega_d}{\omega_{ny}}\right)^2}}. \quad (3)$$

将上式进一步化简,最终可得:

$$S_y \approx \frac{X_A}{|\omega_{ny} - \omega_d|}. \quad (4)$$

可见,陀螺结构的机械灵敏度主要由驱动位移幅度和驱动模式与检测模式谐振频率的差值决定。

## 2.2 温度对硅微机械陀螺仪敏感结构的影响

硅材料的弹性模量、拉伸强度、残余应力、破坏韧性、疲劳强度等物理特性和结构尺寸受温度影响较大,这些变化会影响陀螺结构的机械参数和梳齿电容,最终使谐振频率、品质因数、标度因数和零偏等参数随温度漂移,降低陀螺仪在全温范围( $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ )<sup>[21]</sup>内的性能。SHH17# 陀螺照片及测试设备如图 2 所示。

为了更直观地反应温度的影响,在全温范围内每隔  $10^\circ\text{C}$  对 SHH17# 陀螺仪的驱动和检测模式

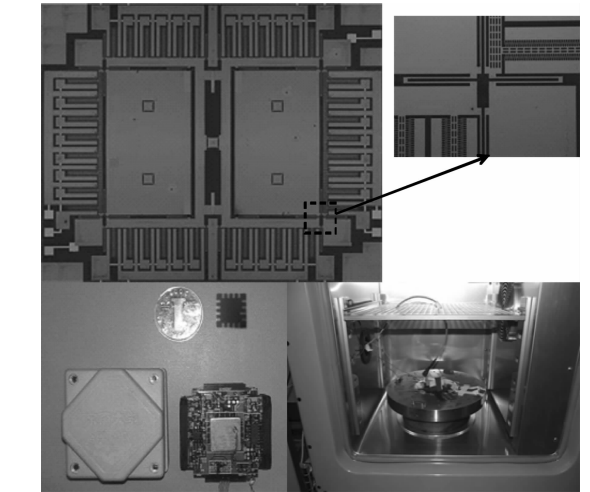


图 2 硅微机械陀螺仪实物图和测试设备

Fig. 2 Photos of MEMS gyroscope and test equipment

的固有频率和品质因数进行一次测试,得到温度曲线如图 3 所示。

从图中可以看出,两模式固有频率的温度系数约为  $20 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,同时两模式的 Q 值在这个温度区间内都降低了约 30%,究其原因,主要是由密封腔内空气分子和杂质颗粒的布朗运动以及吸气剂对空气的吸附能力受温度的变化影响的。标度因数和零偏是极其重要的陀螺仪参数,稳定与否直接关系到后续惯性导航系统的精度。

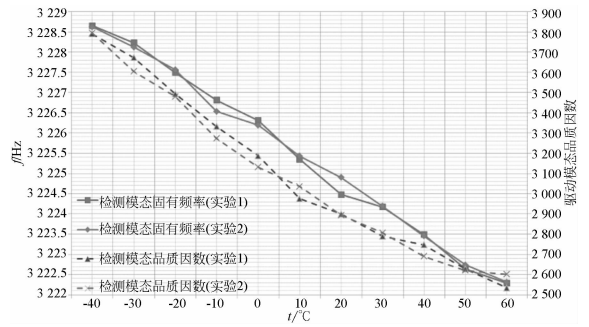
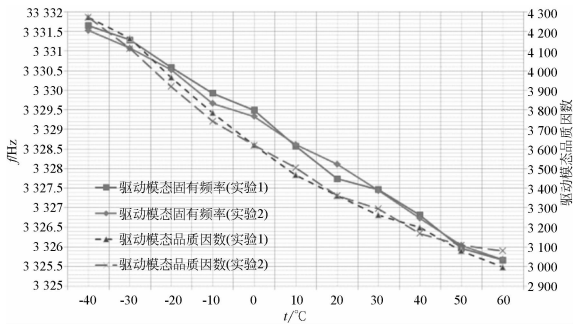


图 3 SHH17 # 驱动和检测模式的固有频率和品质因数温度曲线

Fig. 3 Temperature curves of resonant frequencies and quality factors for SHH17 # 's drive and sense modes

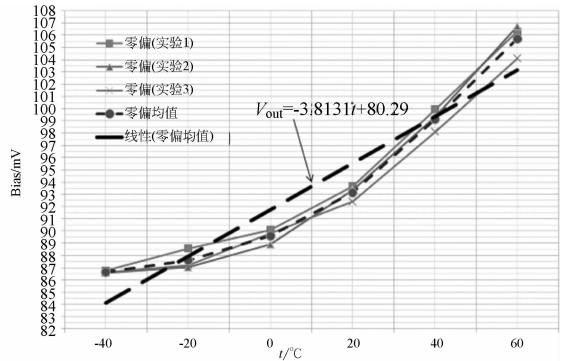
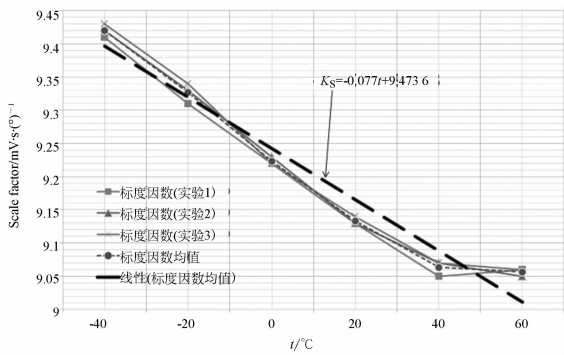


图 4 SHH17 # 标度因数和零偏温度曲线

Fig. 4 Temperature curves of scale factor and bias for SHH17 # 's

对工作状态下的 SHH17 # 陀螺仪温度特性进行了测试,在常温状态下上电,升温至 60 °C,然后每次降温 20 °C 直至 -40 °C,在每个温度点保温 40 min 以保证陀螺仪壳内外温度相同,然后采集零偏输出 60 min,再测量标度因数,全温测试结果如图 4 所示,标度因数和零偏的温度系数分别为  $393 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  和  $75(^\circ) \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (标度因数取  $9.23 \text{ mV} \cdot \text{s} \cdot (^\circ)^{-1}$ ),直观地说明了温度对这两个参数的影响。为了验证标度因数和零偏的重复性,对这两参数的全温实验各进行了 3 次,结果显示重复性较好,并对这 3 组数据取均值后进行了最小二乘拟合。

### 3 温度补偿方法研究

讨论温度补偿的实现过程大致分为 4 步:首先对整个测控电路(如图 5)进行分析,找到合适的补偿点,其次根据热敏铂电阻和温度的关系(如式 5)设计补偿电路,然后对设计的补偿电路进行仿真,最后在实际电路上实现并进行温度试验,分析补偿

结果

$$R_t = R_0(1 + at), \tag{5}$$

式中: $R_t$ 和 $R_0=1 \text{ k}\Omega$ 分别为 $t \text{ } ^\circ\text{C}$ 和 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时对应的热敏电阻值, $a = 3.908 \text{ } 02 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 为热敏电阻温度系数。由于标度因数补偿后会引入零偏的变化,所以先对标度因数进行补偿,达到满意效果后再补偿零偏。需要强调的是,引入补偿环节后可能会对系统产生影响,所以仿真只能粗略估计补偿后的趋势。

如图 5 所示,SHH17 # 陀螺驱动回路采用 AGC 自激振荡驱动方式,驱动位移信号  $x(t)$  被转换成电容信号后经前置放大器放大后进入  $90^\circ$  移相环节,移相后的信号  $V_D = V_{ac} \sin(\omega_d t)$  经过整流模块后与参考基准  $V_{ref}$  求差,其结果经积分器后被  $V_D$  信号调制再与直流分量  $V_{dc}$  叠加成为驱动模式的驱动信号  $u(t)$ ,经力矩转换器后变为静电力作用到驱动梳齿。检测模式采用开环检测,检测位移  $y(t)$  被转化成电容信号后经前置和次级放大器后被以  $\sin(\omega_d t)$  为基准的信号解调,得到哥氏信号  $V_s(t)$ ,经过低通滤波器后输出。图中  $K_{YC}, K_{XC}, F_n$

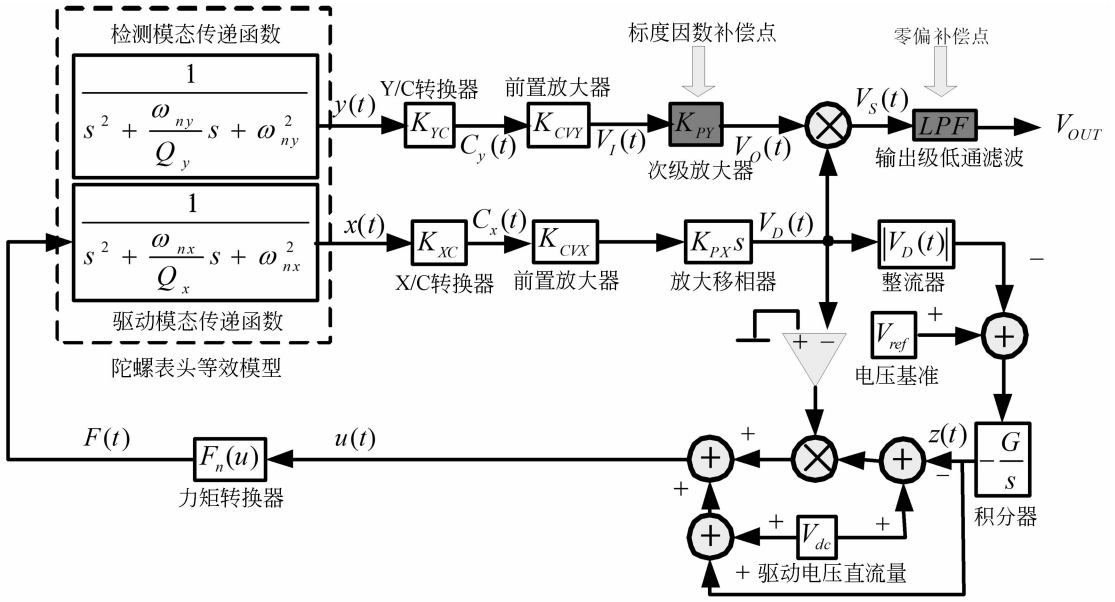


图 5 SHH17# 陀螺仪测控电路原理图

Fig. 5 Schematic of monitor circuit for SHH17#

均与陀螺结构中梳齿个数和尺寸有关。通过平均法可以证明上述闭环驱动回路能将  $X_A$  稳定控制<sup>[20]</sup>。对检测回路进行分析,将式(2),(3),式(4)

和  $\varphi_y$  代入可得到式(6),标度因数  $K_S$  与驱动幅度和检测回路放大倍数成正比,与两模态的频率差成反比:

$$\frac{V_{OUT}}{\Omega_z} = \frac{-2X_A \omega_d K_{YC} K_{CVY} K_{PY} V_{ac}}{\sqrt{(\omega_{ny}^2 - \omega_d^2)^2 + \left(\frac{\omega_{ny} \cdot \omega_d}{Q_y}\right)^2}} \cos\left(\arctan \frac{\omega_{ny} \omega_d}{(\omega_{ny}^2 - \omega_d^2) Q_y}\right) \approx \frac{-X_A K_{YC} K_{CVY} K_{PY} V_{ac}}{|\omega_{ny} - \omega_d|} \quad (6)$$

### 3.1 标度因数温度补偿

通过对 SHH17# 陀螺测控电路的分析,认为在驱动电路中加入补偿环节势必会影响陀螺驱动模态的工作状态,不利于闭环的稳定,而本文涉及的微结构又无法调节模态的频率,所以选取了在次级放大器  $K_{PY}$  加入补偿环节。对该模块的电路进行定量分析,图 4 中用最小二乘法对标度因数全温变化曲线的均值进行拟合得:

$$K_S = -0.077 t + 9.473 6, \quad (7)$$

式中:  $t$  为温度( $^{\circ}C$ )。

图 5 中  $K_{PY}$  采用了复合放大器以保证检测回路有足够大的环路增益和高相位精度,该模块电路展开如图 6 所示,其传递函数为:

$$K_{PY} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(R_1 + R_2 + R_{t1})R_3}{R_1(R_3 + R_4)}, \quad (8)$$

式中:  $R_{t1}$  (同  $R_t$ ) 为式(5)中描述的热敏电阻,则补偿模块的增益具有正温度系数,匹配电阻值使  $K_{PY}$  正温度系数等于 0.077,以补偿掉标度因数的温度

系数。相关电阻值如表 1 所示。

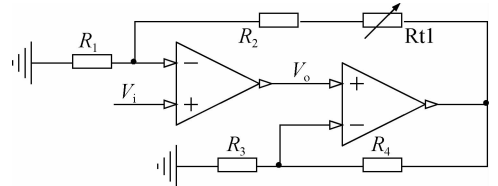


图 6 标度因数补偿点电路图

Fig. 6 Schematic of scale factor compensation point circuit

表 1 电路参数

Tab. 1 Parameters of circuit

参数	阻值(kΩ)		参数	阻值(kΩ)	
	补偿前	补偿后		补偿前	补偿后
$R_1$	10	1.5	$R_5$	$\infty$	1.5
$R_2$	50	7.5	$R_6$	$\infty$	20
$R_3$	100	50	$R_8$	$\infty$	$R_7$
$R_4$	10	10	$R_{t2}$	1	$R_t$
$R_{t1}$	1	$R_t$			

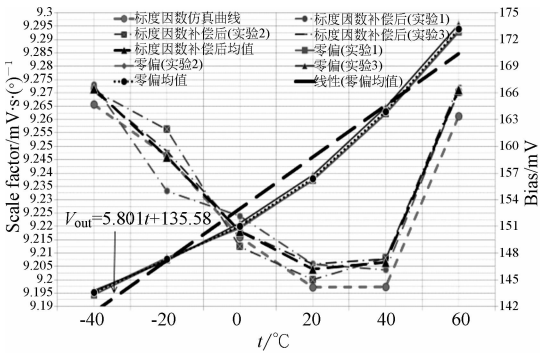


图 7 标度因数补偿后曲线及零偏变化

Fig. 7 Temperature curves of scale factor and bias after scale factor compensation

图 7 为标度因数补偿的相关曲线,其中圆形标记的短虚线为标度因数仿真曲线,点划线为 3 组实测曲线,三角形标记的长虚线为 3 组实测值均值,仿真结果与实际趋势大致吻合,而且补偿后标度因数的温度重复性较好,其全温变化量约为  $73 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (取  $K_S = 9.20 \text{ mV} \cdot \text{s} \cdot (^\circ)^{-1}$ )。圆点虚线为标度因数补偿后的零偏均值,宽虚线为其最小二乘拟合线。

$$V_o = 5.801t + 135.58, \quad (9)$$

与补偿前的状态(图 4)相比变化较大,其温度系数变为  $115.6 (^\circ) \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  且有较好的线性趋势,有利于下一步的补偿,式中  $t$  为温度( $^\circ\text{C}$ )。

### 3.2 零偏温度补偿

通过对图 5 的进一步分析,选择将零偏补偿模块加在检测环路的输出级的低通滤波器,这样不仅可以通过电压叠加的方式抵消掉原有的零偏温度漂移,而且对整个系统的影响最小,将该模块的电路展开后如图 8 所示,其中虚线框内为补偿电路,其传函满足式(10)。 $V_{\text{rdc}}$  和  $R_{12}$ 、 $R_{13}$  组成零位补偿电路,用于零偏校零:

$$\frac{V_{\text{ref}} \times (R_6 + R_{t2(60^\circ)})}{R_5 + R_6 + R_{t2(60^\circ)}} - \frac{V_{\text{ref}} \times (R_6 + R_{t2(-40^\circ)})}{R_5 + R_6 + R_{t2(-40^\circ)}} = \frac{\Delta U_o}{A_{\text{LFP}}}, \quad (10)$$

式中:  $V_{\text{ref}} = 5 \text{ V}$  为补偿电路的电压基准;  $\Delta U_o$  为标

度因数补偿后的零偏全温变化量(约为  $30 \text{ mV}$ );  $A_{\text{LFP}} = -5$  为低通滤波器的幅度增益;  $R_{t2(-40^\circ)}$  和  $R_{t2(60^\circ)}$  分别是热敏电阻  $R_t$  (同  $R_t$ ) 在  $-40$  和  $60 \text{ } ^\circ\text{C}$  对应的阻值。由于该模块对电路其他部分基本没有影响,故可结合图 7 中数据模拟出  $V_{\text{out}}$  温度趋势,适当调节零位补偿电路参数,减小零偏输出量。按表 1 中电阻值置换后测得全温零偏变化曲线如图 9 所示,实测曲线基本符合仿真的趋势,零偏温度系数约为  $20 (^\circ) \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  (取  $K_S = 9.20 \text{ mV} \cdot \text{s} \cdot (^\circ)^{-1}$ ), 补偿效果显著。从 3 组重复实验曲线可以看出零偏补偿重复性良好。

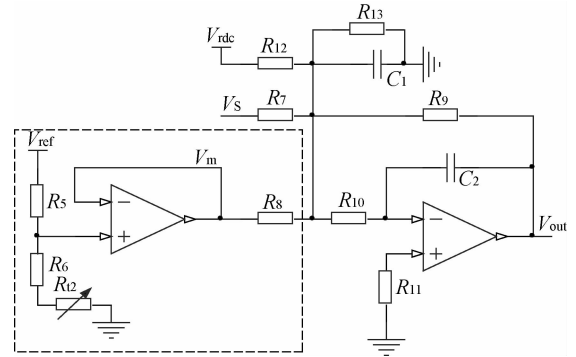


图 8 零偏补偿点电路图

Fig. 8 Bias compensation point circuit

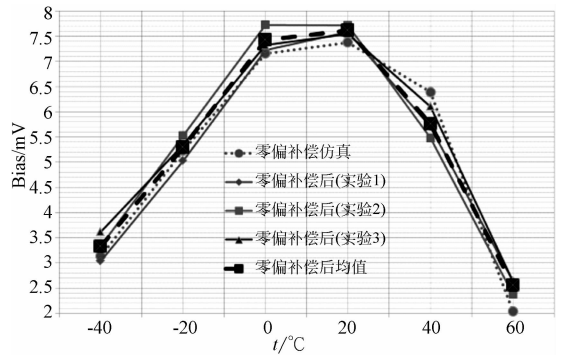


图 9 零偏补偿仿真和全温测试结果

Fig. 9 Temperature curves after bias compensation

度因数数和零偏补偿前后的变化如表 2 所示,通过补偿,标度因数数和零偏的全温性能都有了很大提高。

表 2 补偿结果比较表

Tab. 2 Comparison of compensation results

参数	标度因数( $K_S$ )			零偏( $V_{\text{out}}$ )		
	0°C 基准值 /( $\text{mV} \cdot \text{s} \cdot (^\circ)^{-1}$ )	最大变化值 /( $\text{mV} \cdot \text{s} \cdot (^\circ)^{-1}$ )	温度系数 ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	0°C 对应值 /mV	最大变化量 /mV	温度系数 /( $^\circ) \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
补偿前	9.23	0.363 3	393	89.59	19.06	74.6
补偿后	9.20	0.068 4	73	7.33	5.17	20.2
改进量	—	81.2%	81.4%	—	72.9%	72.9%

## 4 结 论

本文介绍了一种基于微机械陀螺仪测控电路进行的温度补偿的新方法,首先以自主研发的 SHH17 # 陀螺仪为对象介绍了敏感结构;其次分析了温度变化对陀螺的影响并进行了温度实验,对曲线分析后得到标度因数和零偏的温度系数分

别为  $393 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  和  $74.6(\text{ } ^\circ) \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ; 然后通过分析陀螺的测控电路选定了补偿点,后依次进行理论分析和仿真;最后进行了实验并进行了分析和总结。通过补偿,标度因数和零偏的温度系数分别提高到了  $73 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  和  $20.2(\text{ } ^\circ) \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 证明所提出的补偿方案的有效性,并验证了方法的可重复性。

## 参考文献:

- [1] 李建利,房建成,盛蔚,等. 双质量块调谐输出式硅 MEMS 陀螺仪的理论计算及仿真[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(3): 484-491.  
LI J L, FANG J CH, SHENG W, *et al.*. Calculation and simulation of silicon MEMS gyroscope with dual-mass resonant output [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 484-491. (in Chinese)
- [2] 夏国明,杨波,王寿荣. 硅机械陀螺自激驱动数字化技术[J]. 光学 精密工程, 2010, 19(3): 635-640.  
XIA G M, YANG B, WANG SH R. Digital self-oscillation driving technology for silicon micro machined gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 19(3): 635-640. (in Chinese)
- [3] 施芹,苏岩,袁安萍,等. MEMS 陀螺仪器件级真空封装技术[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(8): 1987-1992.  
SHI Q, SU Y, QIU A P, *et al.*. Device level vacuum packaging technologies of MEMS gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1987-1992. (in Chinese)
- [4] 杨波,王寿荣,李坤宇,等. 利用负刚度效应调谐的硅调谐式陀螺仪[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(11): 2398-2406.  
YANG B, WANG SH R, LI K Y, *et al.*. Silicon turning gyroscope tuned by negative stiffness effect [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2398-2406. (in Chinese)
- [5] PATEL C, McCLUSKEY P, LEMUS D. Performance and reliability of MEMS gyroscope at high temperature [C]. *IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermo-mechanical Phenomena in Electronic Systems, Las Vegas*, 2010: 1-5.
- [6] 王淑娟,吴广玉. 惯性器件温度误差补偿方法综述[J]. 中国惯性技术学报, 1998, 6(3): 44-49.  
WANG SH J, WU G Y. A summary of the methods for compensating temperature error of inertial devices [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1998, 6(3): 44-49. (in Chinese)
- [7] HO G K, SUNDARESAN K, POURKAMALI S. Micromechanical IBARs: tunable high-Q resonators for temperature-compensated reference oscillators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(3): 503-515.
- [8] HOU Z Q, XIAO D B, WU X Z, *et al.*. Effect of die attachment on key dynamical parameters of micro-machined gyroscopes [J]. *Microsyst Technol*, 2012, 18(4): 507-513.
- [9] XU L, YANG B, WANG SH R, *et al.*. On-Chip Temperature-control technology for silicon Micro-gyroscope [J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 483: 228-231.
- [10] LEE S H, CHO J, LEE S W, *et al.*. A low-power oven-controlled vacuum package technology for high-performance MEMS [C]. *IEEE 22nd International Conference on MEMS, Sorrento*, 2009: 753-756.
- [11] XIA D Z, CHEN S L, WANG SH R, *et al.*. Microgyroscope temperature effects and compensation-control methods [J]. *Sensors*, 2009, 9(10): 8349-8376.
- [12] PRIKHODOKO I P, TRUSOV A A, SHKEL A M. Compensation of drifts in high-Q MEMS gyroscopes using temperature self-sensing [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 201(10): 517-524.
- [13] ZHANG Y S, WANG S W. Modeling and error compensation of MEMS gyroscope dynamic output data within the whole temperature range [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 311-313: 768-771.

- [14] FANG J CH, LI J L. Integrated model and compensation of thermal errors of silicon microelectromechanical gyroscope [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(9): 2923-2930.
- [15] ZHU X H, CHU H J, SHI Q, *et al.*. Experimental study of compensation for the effect of temperature on a silicon micromachined gyroscope [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 2009, 222: 49-55.
- [16] 程龙, 王寿荣, 叶甫. 硅微机械振动陀螺零偏温度补偿研究[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(3): 483-485.  
CHENG L, WANG SH R, YE F. Research on bias temperature compensation for micromachined vibratory gyroscope [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(3): 483-485. (in Chinese)
- [17] SHIAU J K, MA D M, CHEN X H, *et al.*. MEMS gyroscope null drift and compensation based on neural network [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 255-260:2077-2081.
- [18] YIN Y, WANG SH R, WANG C CH, *et al.*. Driving-mode test of dual-mass MEMS gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1355-1360.
- [19] 袁安萍, 苏岩, 王寿荣, 等. 残余应力对Z轴硅微机械振动陀螺仪性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(6): 228-232.  
QIU A P, SU Y, WANG SH R, *et al.*. Effect of stresses on micromachined Z-axis vibrating rate gyroscope [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(6): 228-232. (in Chinese)
- [20] 王寿荣, 黄丽斌, 杨波. 微惯性仪表与微系统[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2011.  
WANG SH R, HUANG L B, YANG B. *Micro Inertial Instrument and Micro System* [M]. Beijing: Publishing House of Ordnance Industry, 2011. (in Chinese)
- [21] 微机械陀螺联合测试组. 微机械陀螺仪测试细则[S]. 北京: 微机械陀螺仪联合测试组, 2010.  
Micro mechanical gyroscope united test group. *Micro mechanical gyroscope test conditions* [S]. Beijing: Micro Mechanical Gyroscope United Test Group, 2010. (in Chinese)

#### 作者简介:



曹慧亮(1986—),男,河北石家庄人,博士研究生,主要从事微系统测控技术方面的研究。E-mail: caohuilang1986@126.com



王寿荣(1946—),男,江苏兴化人,教授,博士生导师,1970年、1982年于东南大学分别获得学士、硕士学位,主要从事惯性技术、微机电系统、精密仪器及机械等领域的教学与科研。E-mail: srwang@seu.edu.cn



杨波(1979—),男,湖北潜江人,副教授,硕士生导师,2007年于东南大学获博士学位,主要从事微机电系统理论及应用的研究。E-mail: yangbo20022002@163.com.



黄丽斌(1974—),女,副教授,硕士生导师。2004年于东南大学获得博士学位。主要从事微机械系统设计等方面的研究。E-mail: huanglibin@seu.edu.cn

#### 导师简介:



李宏生(1964—),男,江苏泰州人,教授,博士生导师,1994年于东南大学获得博士学位,主要从事新型惯性仪表理论、设计及其信号检测、处理与控制等领域的研究。E-mail: hsli@seu.edu.cn